

# 第八章 压气机的热力过程

## Processes in Compressor

### 8-1 概述

### 8-2 单级活塞式压气机工作原理和理论耗功量

### 8-3 余隙容积的影响

### 8-4 多级压缩和级间冷却

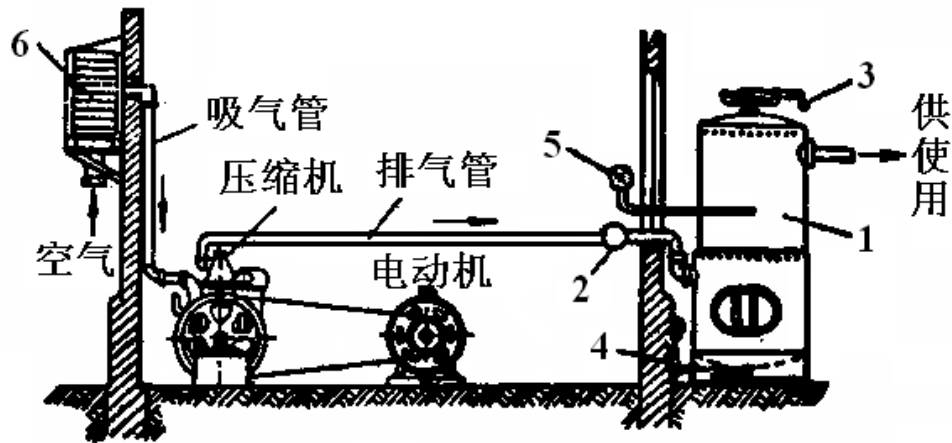
### 8-5 叶轮式压气机工作原理



## 8-1 概述

压缩气体的用途:

动力机、风动工具、制冷工程、化学工业、潜水作业、医疗、休闲等。



往复式空气压缩机装置简图

1. 储气罐 2. 止回阀 3. 安全阀 4. 泄水阀  
5. 压力表 6. 空气滤清器

压头高低

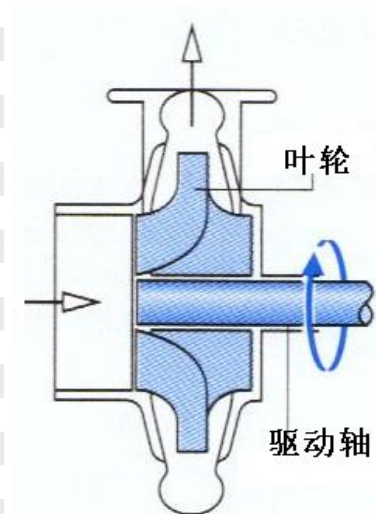
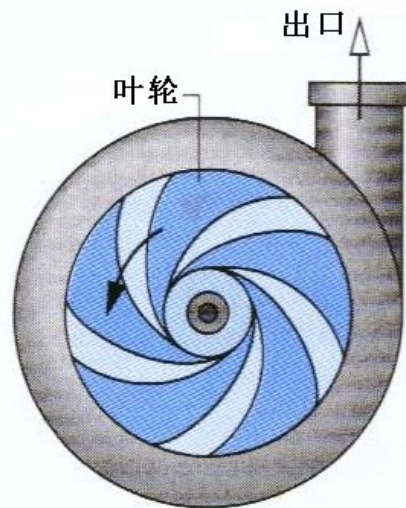
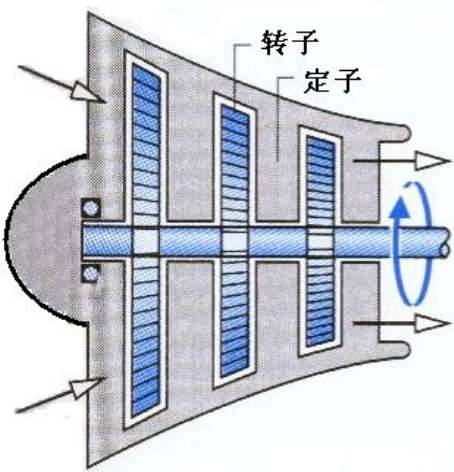
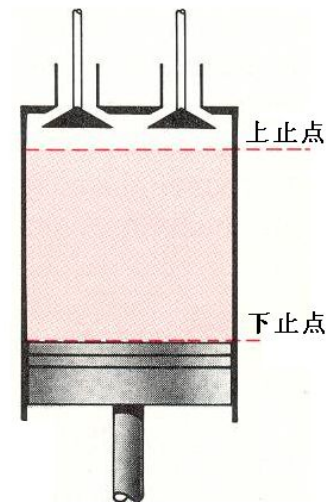
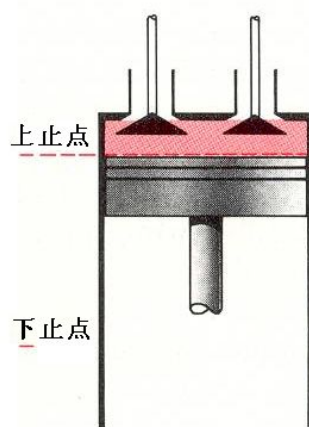
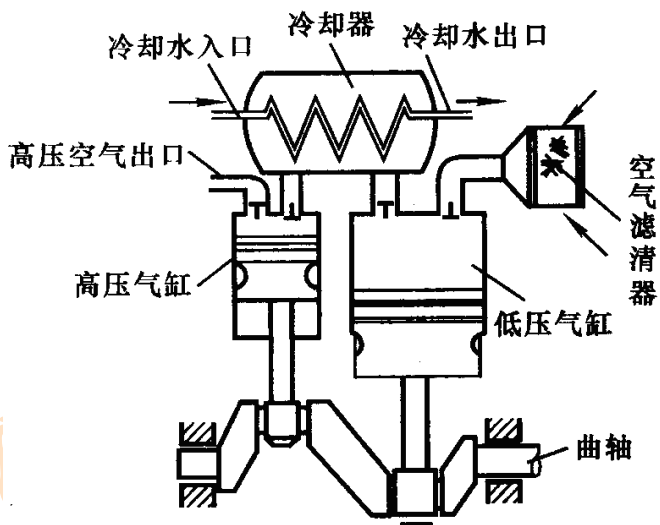
- 通风机—表压0.01MPa以下
- 鼓风机—表压0.1~0.3MPa
- 压气机—表压0.3MPa以上



# 压气机分类

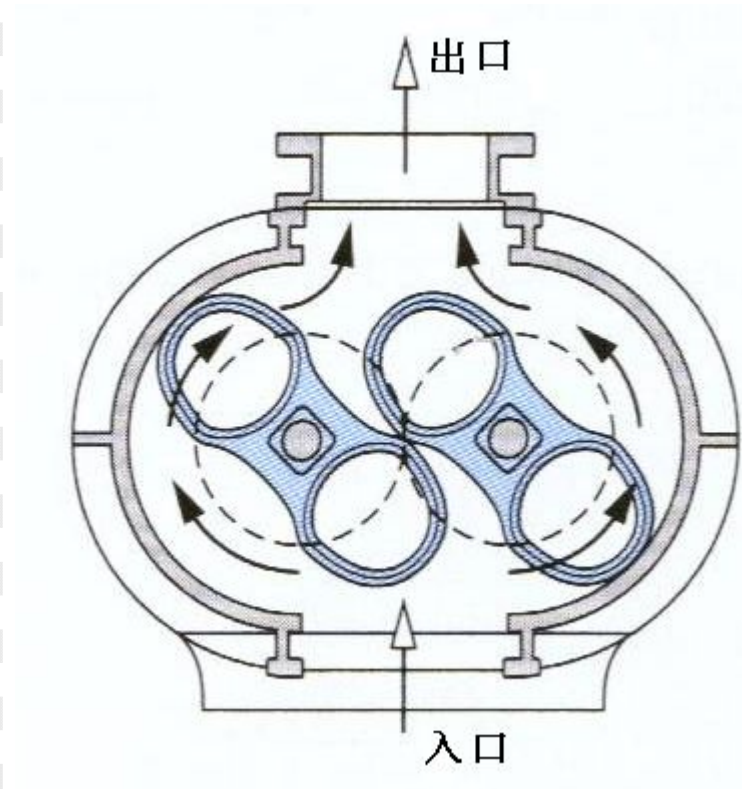
## 按工作原理

- ★活塞式—压头高，流量小，间隙生产
- ★叶轮式—压头低，流量大，连续生产



另有罗茨式压气机(Roots blower),等等。

吉祥

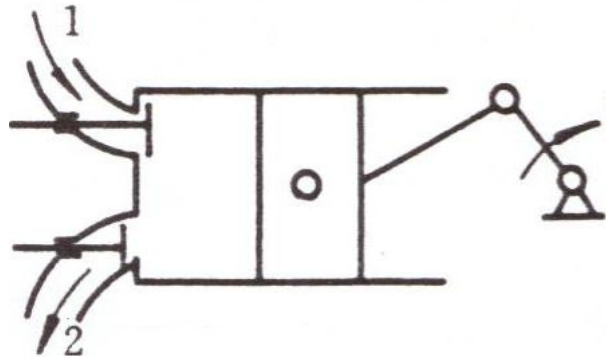


压气机不是动力机，压气机中进行的过程不是循环

吉祥  
吉祥  
吉祥  
吉祥

# 8-2 单级活塞式压气机工作原理和理论耗功量

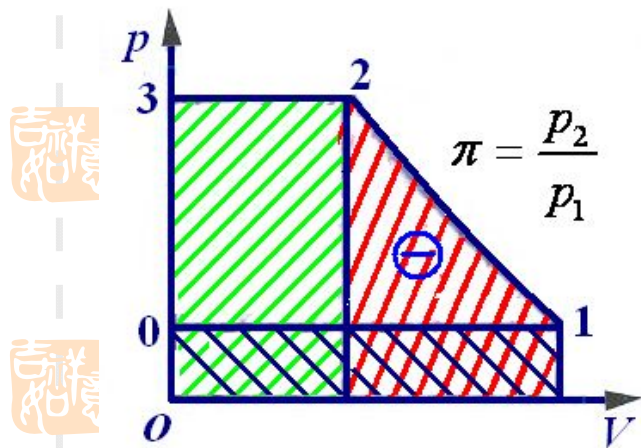
## 一、工作原理



0-1: 吸气, 传输推动功  $p_1 v_1$

1-2: 压缩, 耗外功  $w_{1-2} = \int_1^2 p dv$

2-3: 排气, 传输推动功  $p_2 v_2$



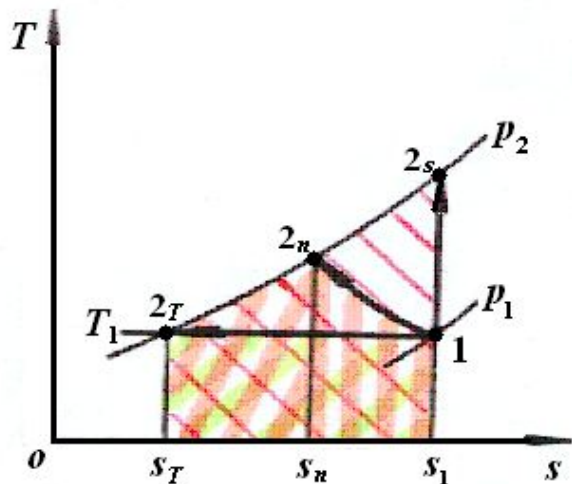
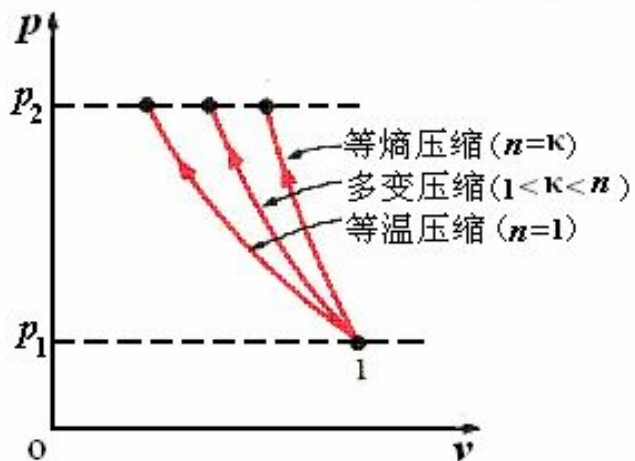
压气机耗功:

$$\begin{aligned} W_C &= p_1 V_1 - \int_1^2 p dV - p_2 V_2 \\ &= \int_1^2 V dp = -W_t \end{aligned}$$

**注意:** 压气机生产量通常用单位时间里生产气体的标准立方米表示, 不同于进气或排气状态。



## 二、理论耗功



$$w_C = \int_1^2 v dp \quad \pi = \frac{P_2}{P_1}$$

$w_C$  取决于初、终态及过程特征

### 1. 绝热压缩

$$w_{C,s} = h_{2s} - h_1 = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R_g T_1 \left( \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right)$$

### 2. 等温压缩

$$w_{C,T} = R_g T_1 \ln \pi$$

### 3. 多变压缩

$$w_{C,n} = \frac{n}{n-1} P_1 v_1 \left( \pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

讨论:

a)

$$\left. \begin{aligned} W_{C,s} &> W_{C,n} > W_{C,T} \\ T_{2s} &> T_{2n} > T_{2T} \\ v_{2s} &> v_{2n} > v_{2T} \end{aligned} \right\}$$

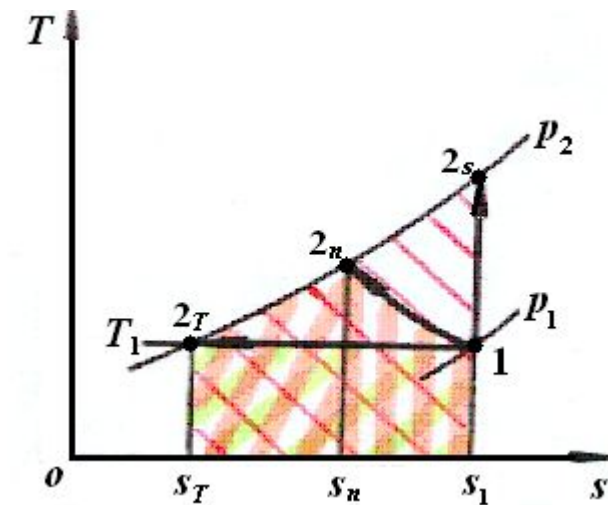
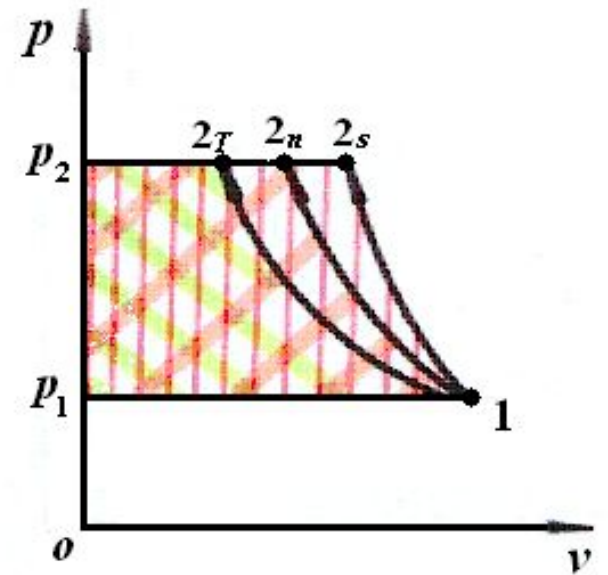
理想压缩是  
等温压缩

b) 通常为多变压缩,  $1 < n < \kappa$

$$n \uparrow \left\{ \begin{array}{l} W_{Cn} \\ T_{2n} \\ v_{2n} \end{array} \right\} \uparrow$$

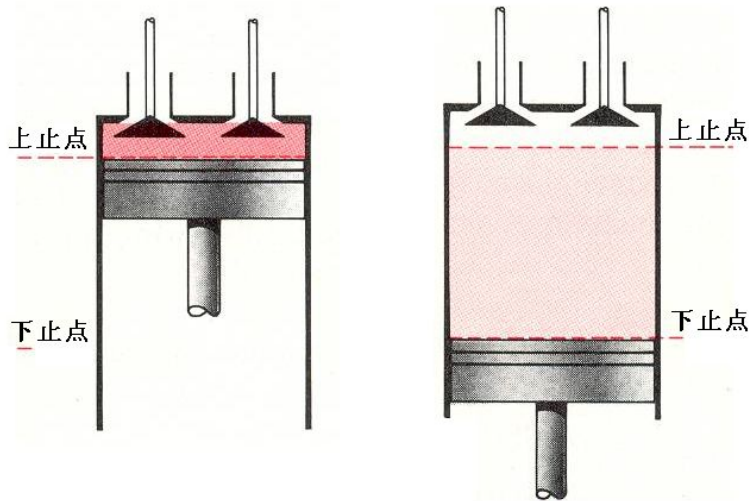
思考

自行车轮胎压力通常应维持在0.25 MPa左右, 用手动打气筒向轮胎充气时用湿毛巾包在打气筒外壁, 会有什么后果? 7



## 8-3 余隙容积的影响

### 一、余隙容积 (clearance volume)



产生原因

布置进、排气结构  
制造公差  
部件热膨胀

几个名词:

余隙容积  $V_c (=V_3)$

气缸工作容积(活塞排量)  $V_h (=V_1 - V_3)$

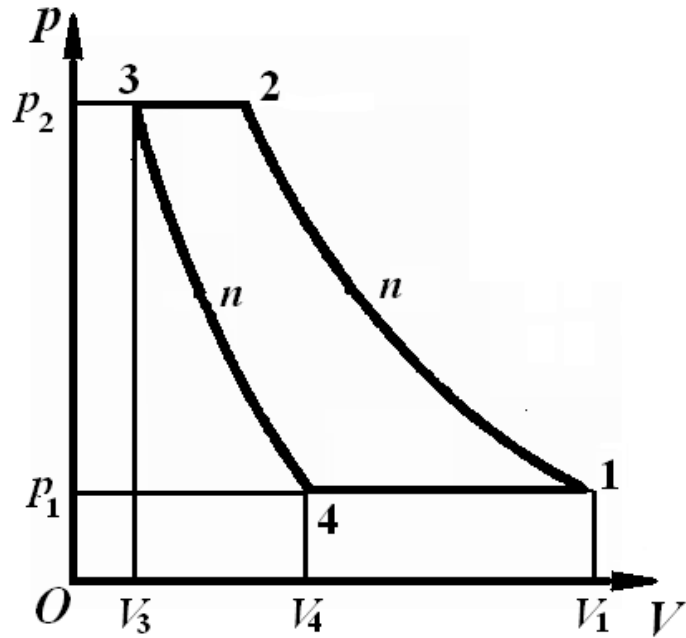
( cylinder displacement; stroke volume;  
piston displacement; piston swept volume )

有效吸气容积  $V_{es} (=V_1 - V_4)$

余隙容积比(clearance-to-piston displacement ratio)

$$\sigma = V_c / V_h$$





生产过程:

1-2 质量 $m_1$ 气体压缩:  $p_1 \rightarrow p_2$

2-3  $m_1 \frac{V_2 - V_3}{V_2}$  气体排向储气罐

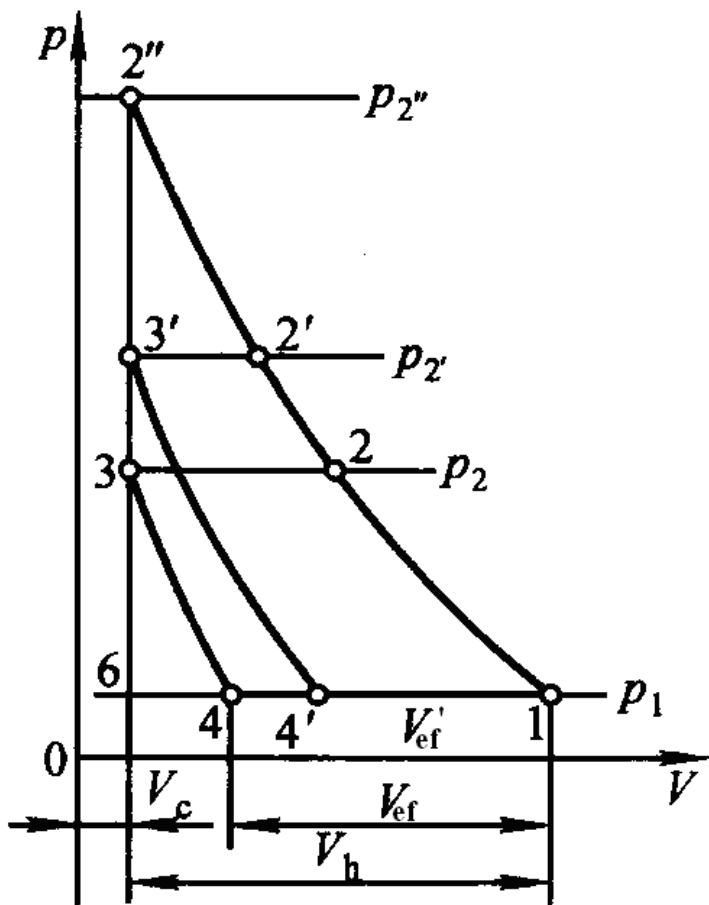
3-4  $m_1 \frac{V_3}{V_2}$  气体膨胀 $p_2 \rightarrow p_1$

4-1  $m_1 \frac{V_1 - V_4}{V_1}$  气体吸入气缸

生产量(每周期):  $m_{\text{生产量}} = m_1 \frac{V_1 - V_4}{V_1}$



## 二、余隙容积对生产量的影响



容积效率 (volumetric efficiency)

$$\eta_V = \frac{V_{cs}}{V_h} = \frac{V_1 - V_4}{V_1 - V_3} = 1 - \frac{V_3}{V_1 - V_3} \left( \frac{V_4}{V_3} - 1 \right)$$

$$= 1 - \frac{V_c}{V_h} \left( \pi^{\frac{1}{n}} - 1 \right) = 1 - \sigma \left( \pi^{\frac{1}{n}} - 1 \right)$$

讨论:

a)  $V_c, V_h$  确定

$$\pi \uparrow \quad \eta_V \downarrow \quad m_{\text{生产量}} \downarrow$$

b)  $\pi$  一定

$$V_c \uparrow \quad V_{cs} \downarrow \quad \eta_V \downarrow \quad m_{\text{生产量}} \downarrow$$

### 三、余隙容积对理论耗功的影响

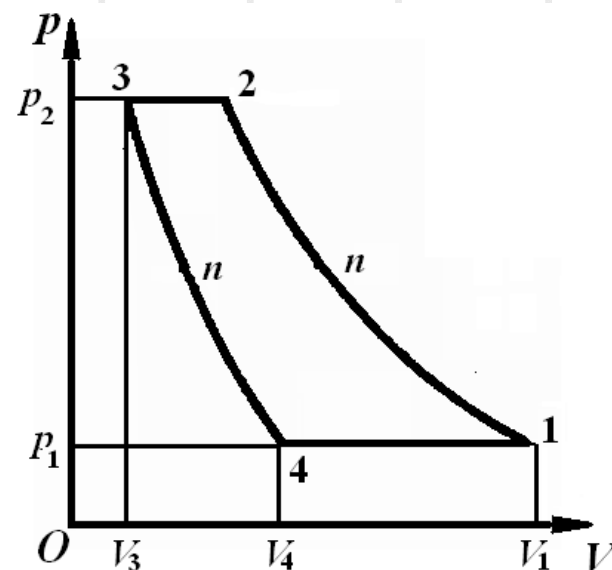
$$W_C = W_{t1-2} - W_{t3-4}$$

$$= \frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left( \pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) - \frac{n}{n-1} p_4 V_4 \left( \pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

$$= \frac{n}{n-1} p_1 (V_1 - V_4) \left( \pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

$$= \frac{n}{n-1} V_{es} p_1 \left( \pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

$$= m_{\text{生产量}} \frac{n}{n-1} v_1 p_1 \left( \pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$





$$w_C = \frac{W_C}{m_{\text{生产量}}} = \frac{n}{n-1} v_1 p_1 \left( \pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

即余隙对理论耗功无影响（实际上还是使耗功增大）。

归纳：

余隙存在使

- 1) 生产量下降
- 2) 实际耗功增大

有害容积



## 8-4 多级压缩和级间冷却

### 一、多级压缩

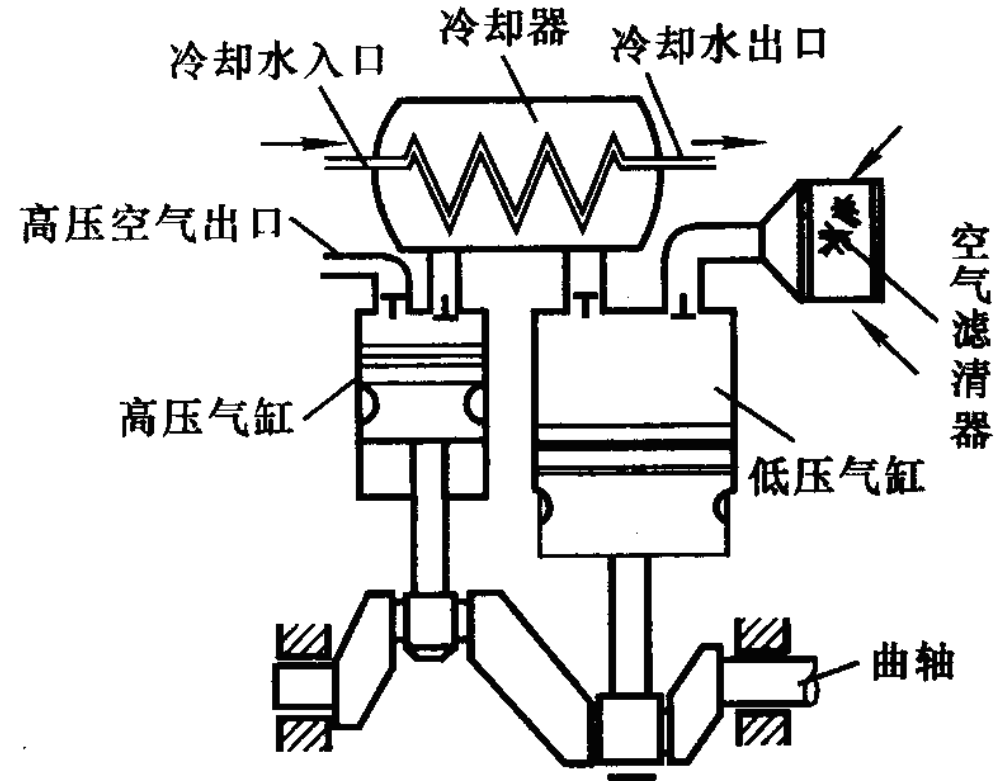
工程上需要高压气体，但压缩过程中随  $p$  升高  $T$  升高； $\eta_V$  下降。为使

$$T_2 \leq T_{2,\max}$$

$$\eta_V \geq \eta_{V,\min}$$

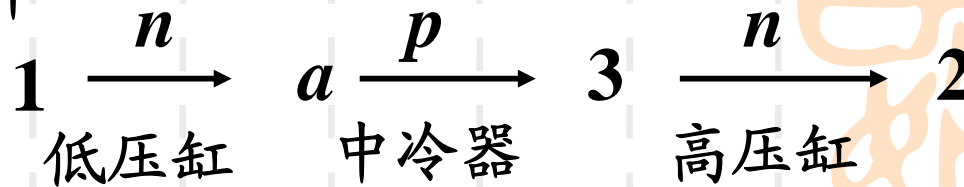
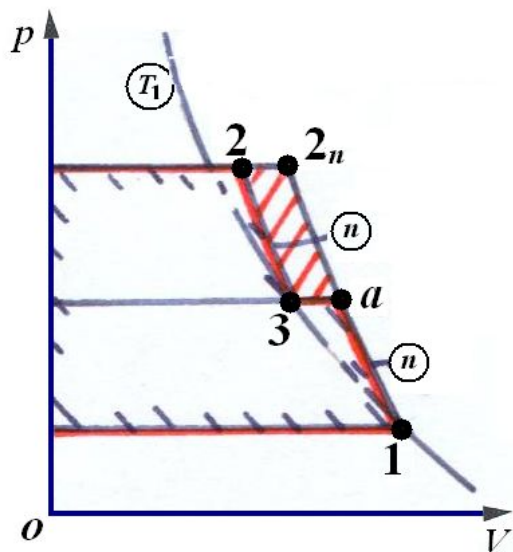


分级压缩 (multistage compression) ，  
级间冷却 (intervening cooling) 。





## 二、理论耗功分析



每生产 1 kg 压缩气体:  $W_C = W_{C,l} + W_{C,h}$

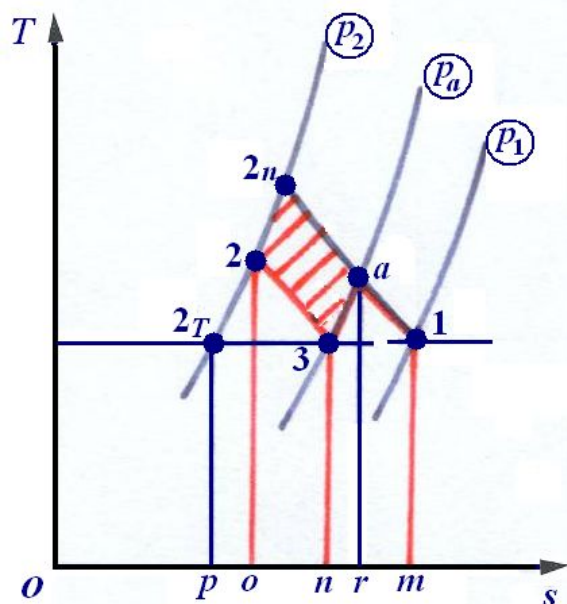
$$W_C = \frac{n}{n-1} R_g T_1 \left[ \left( \frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] + \frac{n}{n-1} R_g T_3 \left[ \left( \frac{p_2}{p_a} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$= \frac{n}{n-1} R_g T_1 \left[ \left( \frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} + \left( \frac{p_2}{p_a} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 2 \right]$$

令  $\frac{\partial W_C}{\partial p_a} = 0$

$$\Rightarrow p_a = \sqrt{p_1 \cdot p_2} \quad \text{或} \quad \pi_l = \frac{p_a}{p_1} = \frac{p_2}{p_a} = \pi_h$$

$$W_C = W_{C,\min}$$



推广：若  $m$  级，则  $\pi_1 = \pi_2 = \dots = \pi_m = \sqrt[m]{\frac{p_2}{p_1}}$  时  $w_C = w_{C,\min}$

讨论：

1) 按  $\pi_i = \sqrt[m]{\frac{p_2}{p_1}}$  选择各级中间压力，优点：

a. 各级耗功相等  $w_{C,i} = \frac{n}{n-1} R_g T_1 \left( \pi_i^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$

有利于曲轴平衡 (总耗功  $w_C = m w_{C,i}$ )

b. 各缸终温相同  $T = T_1 \pi_i^{\frac{n-1}{n}}$  小于不如此分配时  
各缸终温中最高者，有利于润滑油工作及使可靠

性增加。

c. 各级散热相同  $q_i = \frac{n - \kappa}{n - 1} c_v \Delta T$

各中冷器散热相等  $q_{中,i} = c_p \Delta T$

d. 各缸按比例缩小

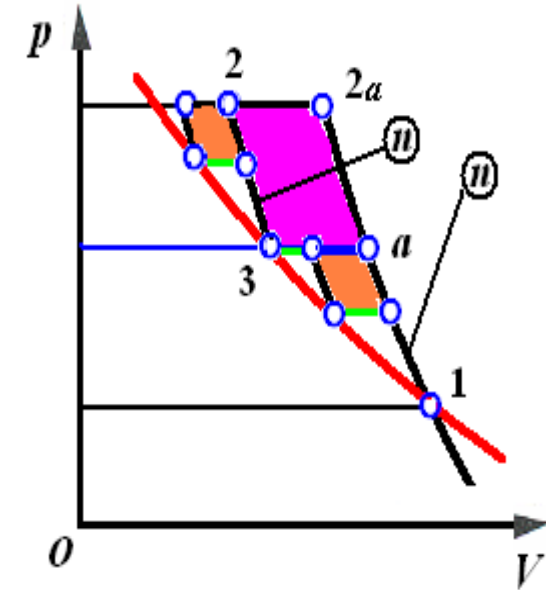
e. 对提高整机容积效率 $\eta_v$ 有利

2) 若分级 $m \rightarrow \infty$ , 则趋于定温压缩但由于体积庞大, 系统复杂, 可靠性下降, 一般2-4级。

3) 定温效率(isothermal efficiency)

$$\eta_{C,T} = \frac{w_{C,T}}{w_C}$$

4) 真空泵(vacuum pump)的实质也是压气机, 是出口压力为恒值—环境压力, 进气压力不断降低的压气机。



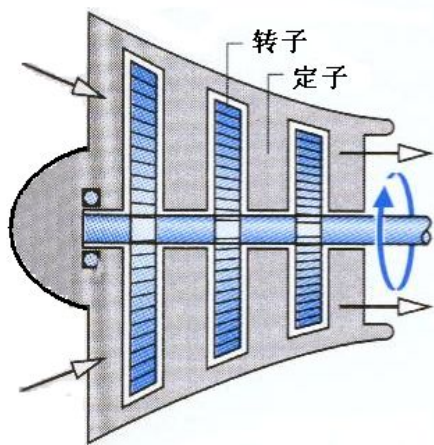
例 [A655355](#)\*



例 [A455155](#)

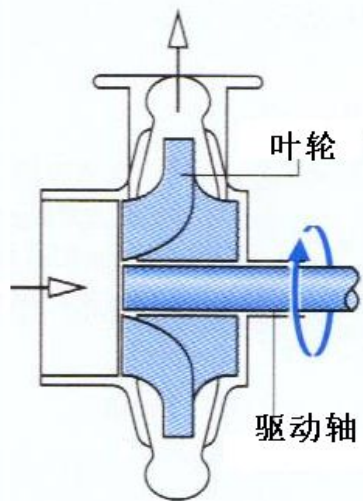
## 8-5 叶轮式压气机工作原理

吉祥



轴流式压气机  
axial-flow compressor

离心式压气机  
centrifugal compressor



### 一、简介

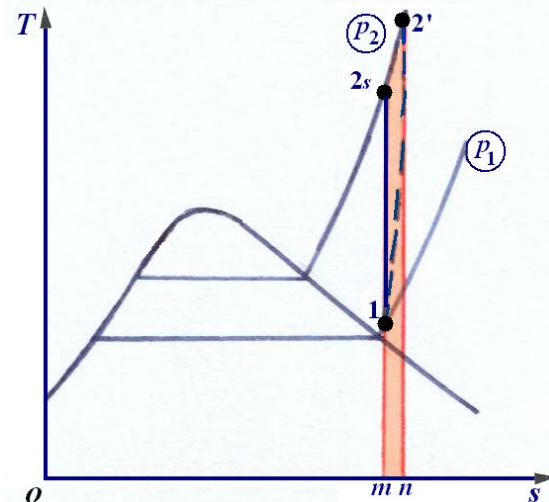
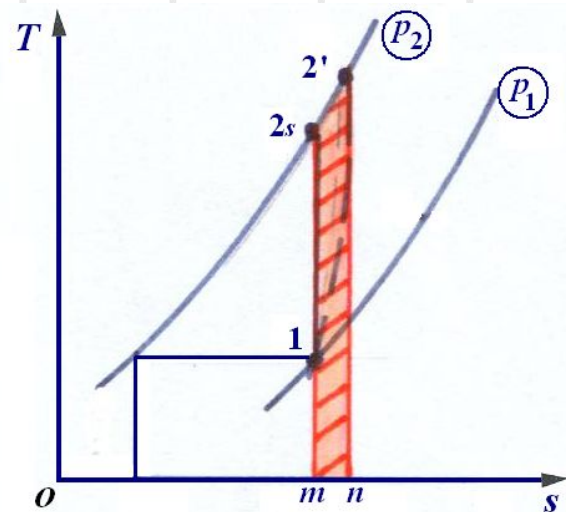
叶轮式压气机(turbo-compressor)：

转速高；连续吸，排气，运转平稳；排气量大  
没有余隙影响；但每级压比不高。

### 二、叶轮式压气机热力学分析

由于排量大，运转快，难冷却，可作绝热压缩考虑。

17



实际多耗功

$$\Delta w_C = h_{2'} - h_{2s} = \text{面积} mn2'2_s m$$

理论耗功

$$w_{C,s} = h_{2s} - h_1$$

实际耗功

$$w_C' = h_{2'} - h_1$$

绝热内效率

(adiabatic internal efficiency)

$$\eta_{CS} = \frac{w_{Cs}}{w_C'} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2'} - h_1} \quad \text{理想气体} \Rightarrow$$

$$\eta_{CS} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_{2'} - T_1} \quad T_{2'} = T_1 + \frac{T_{2s} - T_1}{\eta_{CS}}$$



例A451177

例A453257\*



下一章

